



Beton og lignende materials stivhed

En ny rationel prediktionsmetode

Nielsen, Lauge Fuglsang

Publication date:
1990

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Nielsen, L. F. (1990). *Beton og lignende materials stivhed: En ny rationel prediktionsmetode*. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

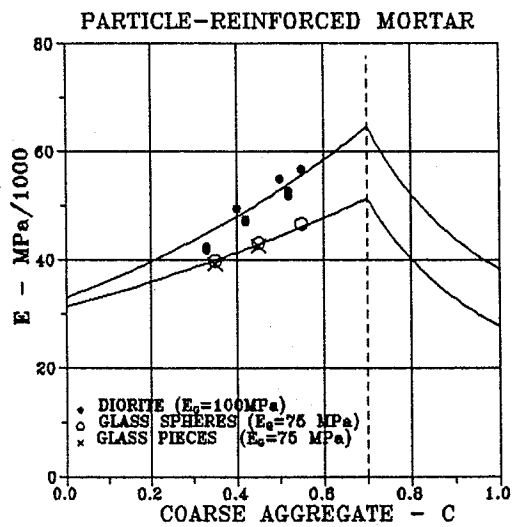
- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

BETON OG LIGNENDE MATERIALERS STIVHED

EN NY RATIONEL PREDIKTIONSMETODE

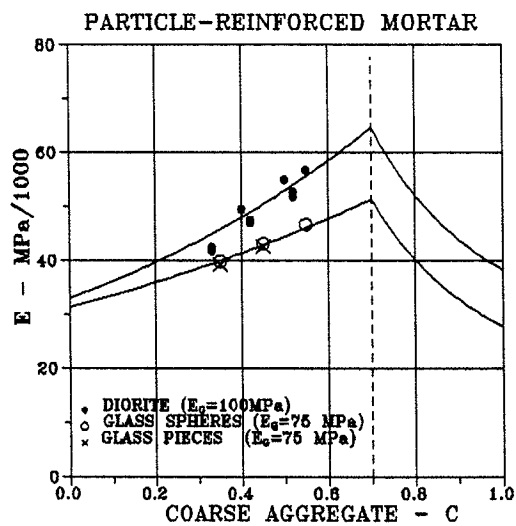
Lauge Fuglsang Nielsen



BETON OG LIGNENDE MATERIALERS STIVHED

EN NY RATIONEL PREDIKTIONSMETODE

Lauge Fuglsang Nielsen



Laboratoriet for Bygningmaterialer
Danmarks Tekniske Højskole
Bygning 118
2800 Lyngby

BETON OG LIGNENDE MATERIALERS STIVHED

EN NY RATIONEL PREDIKTIONSMETODE

Lauge Fuglsang Nielsen

Laboratoriet for Bygningsmaterialer
Danmarks Tekniske Højskole
2800 Lyngby, Danmark

Resumé: Der udvikles en ny metode til bestemmelse af stivheden (Young's modul) for beton og lignende cementbaserede materialer. Metoden gælder for vilkårlige blandingsforhold og inkluderer speciel hensyntagen til alder (modenhed), tilslagstype og fasegeometri. Den tilgodeser herunder de specielle stivhedsmæssige bidrag, der skyldes tilslagernes gradering og kornform, der kan variere fra kompakt rund eller skarpkantet til fiberagtig. Virkningen af svigtende sammenhæng mellem tilslag og de øvrige betonkomponenter er inkluderet i den udviklede prediktionsmetode.

Gennem den specielle fasegeometriske hensyntagen kan metoden anvendes på beton generelt - herunder i forskningen vedrørende materialeforædling og -konservering samt i udviklingen af endnu ikke almindeligt anvendte betoner som for eksempel højstyrke- og genbrugsbetoner.

I. INDLEDNING

Der opstilles i det foreliggende arbejde en ny og rationel prediktionsmetode til bestemmelse af stivheden (Young's modul) for vilkårlige betoner og lignende cementbaserede materialer.

Metoden tager specielt hensyn til betonens alder (modenhed), tilslagernes geometri, størrelsesgradering og evne til at hæfte til cementpasta og mørtel. Den tilgodeser herved forhold, der har afgørende indflydelse på en betons stivhed - men som det ikke tidligere har været muligt at beskrive. Prediktionsmetoden kan derfor anvendes aktivt i forbindelse med udviklingen af endnu ikke almindeligt anvendte betontyper som for eksempel højstyrke- og genbrugsbetoner. Til dette formål predikteres samtidigt betonens tørdensitet og porøsitet.

De anvendte teorier er forfatterens som de er udviklede og med held testede mod eksperimentelle data for diverse kompositmaterialer i (1,2,3,4,5,6). Metoden er konsistent med de af Hashin og Shtrikman (7) opstillede

grænser, hvilket vil sige, at den på forhånd er sikret mod at forudsige resultater, der er umulige for et makroskopt homogent, isotropt kompositmateriale, som beton normalt kan antages at være.

Metodens anvendelse er illustreret i et specielt afsnit på en række betonprodukter. I det afsluttende afsnit diskuteres kort mulighederne for at supplere den foretagne analyse med en tilsvarende styrkeundersøgelse, hvorved en styrke-stivhedsrelation vil kunne etableres til brug for ikke-destruktiv prøvning af betoner - og hvorved prediktionsmetoder kan opstilles med hensyn til holdbarhed overfor frost- eller saltpåvirkning.

Nomenklatur

Der anvendes en del forkortelser i artiklen. Blandt de hyppigst forekommende er følgende:

E_i	Stivhed (Young's modul)
d_i	Densitet
p_i	Porøsitet
V_i	Volumen

hvor indeks, i , refererer til den tilsvarende materialefase (eller fasekombination). Tilsvarende indføres den relative stivhed, n_i , og det relative volumen, c_i , i forhold til en referencefase, j , ved

$$\begin{aligned} n_i &= E_i/E_j && \text{Stivhedsforhold} \\ c_i &= V_i/(V_i+V_j) && \text{Volumenkonzentration} \end{aligned} \quad (1.1)$$

En asterisk (*) markerer en kompositegenskab. Hvor "tilhørsforholdet" klart fremgår af teksten undlades indeks på de nævnte symboler.

Betydningen af andre forkortelser og symboler vil fremgå af den tilgrænsende tekst - evt. ved fremhævning i parentes.

II. KOMPOSITKONCEPT FOR BETON

Grundkomponenterne i beton er vand (W), cement (C), fine partikler (F) og grove partikler (G). Kompositteoretisk optræder disse komponenter i følgende overordnede faseopdeling: Beton (B) er en partikelarmeret mørtel med grove partikler. Mørtel (M) er en partikelarmeret cementpasta med fine partikler. Cementpasta (P) er en blanding af vand og cement, der alt efter mængden af

vand (jfr. Afsnit IV) kan opfattes som et partikelarmet materiale eller et porøst material.

I forhold til cement er massen af vand, fint tilslag og groft tilslag givet ved størrelserne W/C, F/C henholdsvis G/C. Nogle relevante volumener [m^3/kg cement] kan herved udtrykkes som følger ved hjælp af de respektive densiteter [kg/m^3]

Cement:	$V_C = 1/d_C$
Cementpasta:	$V_P = 1/d_C + (W/C)/d_w$
Fint tilslag:	$V_F = (F/C)/d_F$
Mørtel:	$V_M = V_P + V_F$
Groft tilslag:	$V_G = (G/C)/d_G$

III. KOMPOSITMATERIALER

Generelt

Efter (1) kan stivheden af et perfekt sammenhængende kompositmateriale materiale bestående af fase 1 og fase 2 generelt bestemmes ved

$$\frac{E^*}{E_1} = \frac{n + \theta + \theta * (n - 1) * c}{n + \theta - (n - 1) * c} = \text{COMP}(c, n, \mu_{\infty}, M, c_{\infty}) \quad (3.1)$$

hvor fasegeometri og -interaktion tilgodeses gennem de senere forklarede fasegeometriske parametre, μ_{∞} , M og c_{∞} samt formfunktionen, θ . Volumenkoncentration, c, og stivhedsforhold, n, er indført som tidligere defineret i Ligning 1.1 med $i, j = 2, 1$. Det vil sige,

$$c = V_2 / (V_1 + V_2) \quad ; \quad n = E_2 / E_1 \quad (3.2)$$

En fase forekommer som partikler i et kompositmateriale, sålænge fasens volumenkoncentration er mindre end en karakteristisk størrelse - den såkaldte kritiske volumenkoncentration. Med voksende volumenkoncentration udover den kritiske værdi konglomererer (sammensmeltes) partiklerne i stigende grad, hvorved større og større dele af fasen antager en sammenhængende geometri. Kompositmaterialer kan klassificeres i forhold til det gensidige størrelsesforhold af de indgående fasers kritiske volumenkoncentrationer. Dette er gjort i (1), med angivelse af klassespecifikke formfunktioner, θ .

Partikelarmerede materialer

Partikelarmerede materialer er kendetegnede ved, at de to indgående fasers kritiske volumenkoncentrationer er komplementære således, at deres sum er 1. Med den ved Ligningerne 3.1 og 3.2 valgte fasenummerering svarer dette til en proces, hvor et voksende antal partikler (fase 2) blandes i en sammenhængende matrix (fase 1). Ved den kritiske partikelkoncentration, $c = c_{c1}$, bytter faserne roller, geometrisk set, hvorved den oprindelige sammenhængende fase 1 for $c > c_{c1}$ optræder som partikler (med en kritisk volumenkoncentration på $1 - c_{c1}$), mens den oprindelige partikelfase i stigende grad optræder som en sammenhængende fase.

Generelt karakteriserer ovenstående et partikelarmeret materiale, hvor armeringen for $c < c_{c1}$ er fase 2-partikler; mens den for $c > c_{c1}$ er fase 1-partikler. Almindelige partikelarmerede materialer som f.eks. mørtel og beton har $c_{c1} = 1$.

For et partikelarmeret materiale tager formfunktionen, θ , i Ligning 3.1 hensyn til fasegeometri og -interaktion gennem

$$\theta = 0.5 * [\mu * (1 - n) + \sqrt{\mu^2 (1 - n)^2 + 4n}] \quad (3.3)$$

$$\mu = \begin{cases} \mu_0 (1 - c/c_{c1})^M & (c \leq c_{c1}) \\ -\mu_0 (c/c_{c1} - 1)^M & (c > c_{c1}) \end{cases}$$

hvor c_{c1} er den tidligere omtalte kritiske partikelkoncentration. Betydningen af formfaktoren, μ_0 , og interaktionsekspONENTEN, M , forklares nedenfor.

Formfaktoren, $0 < \mu_0 \leq 1$, karakteriserer geometrien af fase 2 ved lav volumenkoncentration. Kugleformet geometri er kendetegnet ved $\mu_0 = 1$. Fladere geometrier med større specifik overflade medfører faldende μ_0 -værdier. Detaljerede oplysninger herom er givet i (1,2).

Interaktionsexponenten, $M \geq 0$, afgør hvor hurtigt partikelinteraktionen stiger med voksende partikelkoncentration. Et bredere spektrum af dimensioner i partikelfasen mindsker interaktionen, hvilket reflekteres gennem et aftagende M . Med $M = 0$ er der ingen interaktionsvariation før interaktionen bliver total ved den kritiske koncentration. Normalt er $M = 0.5 - 1$ et praktisk relevant skøn.

Porøse materialer

Porøse materialer er kendetegnede ved stivhedsforholdet, $n = 0$. Herved reduceres Ligning 3.1 til

$$\frac{E^*}{E_1} = \theta_{\infty} \frac{1 - \frac{c}{c_d}}{\theta_{\infty} + \frac{c}{c_d}} = \text{POR}(c, \mu_{\infty}, M, c_d) \quad (3.4)$$

hvor formfunktionen for $n = 0$ er givet ved

$$\theta_{\infty} = \begin{cases} \mu_{\infty}(1 - c/c_d)^M & ; \quad (c \leq c_d) \\ 0 & ; \quad (c > c_d) \end{cases} \quad (3.5)$$

Efter (1,2) gælder Ligning 3.4 også for kontinuerte poresystemer.

Korrektioner

Svigtende fasesammenhæng: Som tidligere nævnt forudsætter den anførte stivhedsbestemmelse, at der er perfekt sammenhæng mellem partikler og matrix. Denne forudsætning er sjældent til stede i virkelige betoner, specielt for så vidt angår det grove tilslags kontakt med mørtlen. Problemet er behandlet i (5), hvor det er løst ved indførelse af det effektive stivhedsforhold,

$$n_{\text{eff}} = n \cdot (1 - \alpha^{7.5/(5+n)}) \quad (3.6)$$

hvor α er den relative tilslagsoverflade, der unddrager sig sammenhæng med den tilstødende fase. Det er meget normalt (8), at 10 - 30 % af det grove tilslags overflade i normal beton ikke hæfter til mørtlen. D.v.s. $\alpha \approx 0.1 - 0.3$. Vi vil i det følgende tekst underforstå, at stivhedsforholdene er indført som de effektive.

Partikelinterferens: I praksis vil faste partikler i et partikelarmeret materiale interferere med en hyppighed, der vokser med partikelkoncentrationen. Ved den såkaldte interferenskoncentration, c_I , er fænomenet så udpræget, at partikelfasen danner et fast skelet, hvorefter det kun er muligt at have partikelkoncentrationen under samtidig tilførsel af hulrum (interferenshulrum). Interferenskoncentrationen har samme størrelsesorden som partikelfasens pakningsgrad i løs lejring. Interferenskoncentrationen skal ikke forveksles med den kritiske partikelkoncentration, c_d , hvor de indgående faser skifter roller, geometrisk set. Det gælder, at $c_I < c_d$. For gasbeton, med "gas-partikler" omformes partikelfa-

sen kontinuert under interferens således, at der ikke kan tales om en egentlig interferenskonzentration. Formelt sættes c_I lig med gaspartikkelkonzentrationen, c .

Vi kan tilgodese interferensfænomenet ved at multiplicere resultatet opnået ved Ligning 3.1 med nedenstående faktor, F , hvorved kompositmaterialet for $c > c_I$ betragtes som et porøst materiale, hvor faststoffet er beton uden interferens og porerne er det uundgåelige interferenshulrum med et volumen V_H , der i forhold til totalvolumenet, $V_1 + V_2 + V_H$, svarer til en porøsitet på

$$c_H = \text{MAX}[0, (c - c_I)/c] \quad (3.7)$$

hvor partikkelkonzentrationen, c , stadig er udtrykt ved $c = V_2/(V_1 + V_2)$. Bemærk at $c_H \equiv 0$ for "gaspartikler", hvor formelt $c_I = c$.

Den omtalte korrektionsfaktor, F , er nu bestemt ved Ligning 3.4 med de for interferenshulrummet gældende poreparametre. Vi får

$$F = \text{FOR}(c_H, \mu_{cH}, M_H, C_{cH}) \quad (3.8)$$

Bemærk, at $F \equiv 1$ for $c \leq c_I$, idet interferenshulrummet her er $c_H \equiv 0$. Med interferenshulrum er kompositmaterialets totalvolumen givet ved

$$V^* = (V_1 + V_2)/(1 - c_H) \quad (3.9)$$

Med hensyn til kvantificering af de poregeometriske parametre i Ligning 3.8 skal bemærkes følgende: Ved partikkelkonzentrationen, $c = 1$, beskriver kombinationen af Ligningerne 3.1 og 3.8 stivheden af et porøst materiale der udelukkende består af de "sammenlimede" partikler i interferenstilstanden. (Limen er et meget tyndt lag matrixmateriale). Porøsiteten er $1 - c_H$ og poregeometrien er karakteriseret ved de i Ligning 3.8 indførte parametre. Disse skal altså vælges udfra en vurdering af poresystemet i det tomme, sammenlimede interfererende partikelsystem.

Ovenstående bemærkninger er af speciel interesse for materialer, hvor interferensfænomenet er udnyttet bevidst til produktion af letvægtsmaterialer (som fex let klinkerbeton).

Densitet og porøsitet

Densitet og porøsitet af et kompositmateriale følger den simple blandingslov. Med korrektion for interferenshuller vil det sige

$$d^* = [(1 - c)d_1 + c*d_{22}](1 - c_H) \quad (3.10)$$

$$p^* = [(1 - c)p_1 + c*p_{22}](1 - c_H) + c_H \quad (3.11)$$

Specielle materialer

Ligning 3.1 rummer som særtilfælde adskillige stivhedsudtryk, der tidligere er blevet foreslået i litteraturen til bestemmelse af betonagtige materialers stivhed:

For partikelarmerede materialer med kompakte, ekstremt velgraderede partikler ($\mu_0 = 1$, $M = 0$, $c_d = 1$) reduceres Ligning 3.1 til følgende udtryk

$$\frac{E^*}{E_1} = \frac{1 - c + n*(1 + c)}{1 + c + n*(1 - c)} \quad (3.12)$$

der nøje svarer til et udtryk udviklet af Hashin (9) og Hill (10) til bestemmelse af kompressionsmodulen for et kuglearmeret materiale, hvor hver enkelt kugle lokalt har samme volumenkoncentration.

For partikelarmerede materialer med kompakte, ikke særligt velgraderede partikler ($\mu_0 = 1$, $M = 1$, $c_d = 0.5$) reduceres Ligning 3.1 til følgende udtryk

$$E^*/E_1 = 0.5*[(1-2c)*(1-n)+\sqrt{(1-2c)^2(1-n)^2+4n}] \quad (3.13)$$

der genkendes som udviklet af Budiansky (11) for et såkaldt pulvermateriale (to pulvere blandet sammen og herefter sammenpresset).

For et simpelt porøst materiale med $(M, c_d) = (1, 1)$ reduceres Ligning 3.4 til

$$\frac{E^*}{E_1} = \frac{(1 - c)^2}{1 + (1/\mu_0 - 1)c} \quad (3.14)$$

der med forskellige formfaktorer, μ_0 , rummer adskillige empiriske udtryk, der tidligere er foreslået til estimering af porøse materialers stivhed (e.g. 12, 13, 14).

IV. CEMENTPASTA

I dette afsnit bestemmes cementpastaens tidsafhængige

stivhed efter en metode, der er udviklet i (3,4), og som med kvantitativt ubetydelige ændringer resumeres nedenfor i en form, der er konsistent med den i Afsnit III opstillede kompositteori.

Resultaterne er tidsafhængige gennem den så-kaldte hydrateringsgrad (eller modenhed), $g = g(t)$, der til ethvert tidspunkt, t , giver mængden af omdannet cement i forhold til den oprindelige mængde. Der henvises til Appendix A med hensyn til de fase- og volumenmæssige forskydninger, der forekommer under hydrateringsprocessen.

Omdannelsesprocesserne i cementpasta standser, når al cement er hydrateret ved $g(t) = 1$ - eller når der ikke er mere indre plads til hydrationsproduktet, cementgel; det vil sige, når den såkaldte kapillarporøsitet bliver 0. Det fremgår af Appendix A, at de to kriterier gælder for W/C større end, henholdsvis mindre end det "kritiske vand-cementtal" $(W/C)_c$, bestemt ved

$$(W/C)_c = 1.2 \cdot (d_w/d_c) \quad (4.1)$$

Basispasta

Den cementpasta, der i sin sluttetilstand netop består af gel (uden kapillarporer og uden uhydrateret cement) kaldes en basispasta. Basispastaen har det ovenfor givne "kritiske vand-cementtal".

Basispastaens stivhed er bestemt i (3). Dens tørdensitet henholdsvis porøsitet udledes v.hj.a. Ligningerne 3.10 og 3.11 i forbindelse med Appendix A. I rækkefølge er resultaterne udtrykt ved

$$E_{bas} = 3.2 \cdot 10^4 \cdot g \quad \text{MPa} \quad (4.2)$$

$$d_{bas} = [1 + 0.23 \cdot g] \cdot d_c / 2.2 \quad (4.3)$$

$$p_{bas} = 0.455 \cdot (1.2 + p_c) \cdot (1 - g) + 0.282 \cdot g \quad (4.4)$$

Den anførte stivhed er den dynamiske Young's modul. Den statiske modul er ca. 15 % mindre.

Cementpasta $W/C > (W/C)_c$

En sådan cementpasta kan opfattes som et porøst materiale, der som vist i Figur 4.1 har basispasta som faststoffase, V_{bas} , og det overskydende volumen, V_k , som

hulrum, svarende til en porøsitet på

$$c_{PK} = \frac{V_{PK}}{V_F} = \frac{W/C - 1.2*(d_w/d_c)}{W/C + d_w/d_c} \quad (4.5)$$

Som et porøst materiale bestemmes cementpastaens stivhed ved Ligning 3.4. Vi får

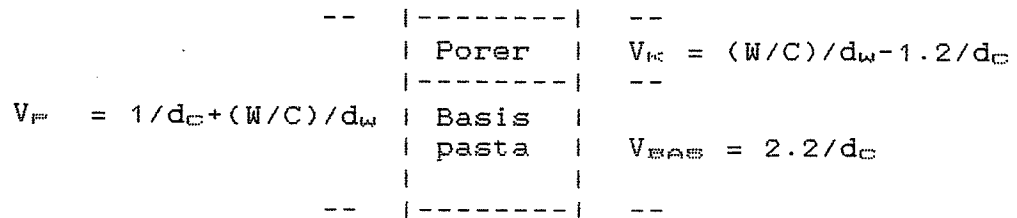
$$E_F = E_{BAS} * POR(c_{PK}, \mu_{cPK}, M_{PK}, c_{dPK}) \quad (4.6)$$

hvor de fasegeometriske parametre efter sammenligning med tilsvarende stivhedsudtryk i (3,4) kan indsættes med $(\mu_{cPK}, M_{PK}, c_{dPK}) = (0.7, 1, 1)$.

Cementpastaens tørdensitet henholdsvis porøsitet er bestemt ved Ligningerne 3.9 og 3.10. Vi får

$$d_F = (1 - c_{PK}) * d_{BAS} \quad (4.7)$$

$$p_F = (1 - c_{PK}) * p_{BAS} + c_{PK} \quad (4.8)$$



Figur 4.1. Cementpasta-sammensætning baseret på 1 kg cement, når $W/C > (W/C)_c$

Cementpasta $W/C < (W/C)_c$

En sådan cementpasta kan opfattes som et partikelarmet materiale, der som vist i Figur 4.2 har basispasta som matrixfase, V_{BAS} , og det overskydende volumen, V_C , som uhydraterede cementpartikler. Partikelkoncentration bliver

$$c_C = \frac{V_C}{V_F} = \frac{1 - 0.83*(W/C)*(d_c/d_w)}{1 + (W/C)*(d_c/d_w)} \quad (4.9)$$

Som et partikelarmet materiale bestemmes cementpastaens stivhed ved Ligning 3.1. Vi får

$$E_F = E_{BAS} * COMP(c_C, n_C, \mu_{cC}, M_C, c_{dC}) \quad (4.10)$$

$$n_C = E_C / E_{BAS}$$

hvor de fasegeometriske parametre efter sammenligning med tilsvarende stivhedsudtryk i (3,4) kan indsættes med $(\mu_{cC}, M_C, c_{dC}) = (1, 0.5, 1)$. Udtrykket skal ikke

korrigeres for interferens, idet matrixfasen (basispastaen) netop udfylder hele rummet mellem cementpartiklerne. Formelt sættes interferenskonzentrationen, $c_I = 1$. Der kan påregnes perfekt fasesammenhæng; det vil sige $\alpha = 0$.

$$\begin{array}{rcc}
 & \text{--} & | \text{-----} | & \text{--} \\
 & & | \text{Cement} | & V_C = 1/d_C - 0.83*(W/C)/d_w \\
 & & | \text{-----} | & \text{--} \\
 V_F = 1/d_C + (W/C)/d_w & & | \text{Basis} | & \\
 & & | \text{pasta} | & V_{BAS} = 1.83*(W/C)/d_w \\
 & & | & \\
 & \text{--} & | \text{-----} | & \text{--}
 \end{array}$$

Figur 4.2. Cementpasta-sammensætning baseret på 1 kg cement, når $W/C < (W/C)_c$

Cementpastaens tørdensitet henholdsvis porøsitet er bestemt ved Ligningerne 3.10 og 3.11. Vi får

$$d_F = (1 - c_C)*d_{BAS} + c_C*d_C \quad (4.11)$$

$$p_F = (1 - c_C)*p_{BAS} + c_C*p_C \quad (4.12)$$

V. BETON OG MØRTEL - EKSEMPLER

Med kendte egenskaber for cementpastaen kan betonens (og mørtlens) tilsvarende egenskaber nu bestemmes gennem en gentagen anvendelse af de kompositteoretiske udtryk, der er udviklet i Afsnit III.

Frengangsmåden er illustreret i Appendix B gennem en algoritme, der direkte kan anvendes som grundlag for for det i Appendix C opstillede Fortran-program til computerprediktion af betonagtige materials stivhed, densitet og porøsitet. De i algoritmen anvendte symboler og indeces svarer nøje til de i teksten definerede. De predikterede stivheder svarer til dynamiske Young's moduler. Ønskes dynamiske værdier indføres basispastaens stivhed blot 10 - 20 % mindre.

Med henblik på prediktionsmetodens anvendelse i materialdesign og -udvikling af betonlignende produkter er alle detaljer vedrørende modenhed, fasegeometri og fasesammenhæng medtaget. For velkendte betontyper reduceres metoden væsentligt, idet de indgående parametres størrelsesorden da kan vælges fra Tabellerne 4.1 og

4.2, der gengiver forfatterens erfaringer vedrørende kendte partikelarmerede materialers elastiske adfærd. For mere utraditionelle betonagtige materialer justeres parametrene i henhold til Afsnit III samt (1,2).

Fase		d	E	α	p
		[kg/m ³]	[MPa]		
Cement	(C)	3150	75000	0	0
Sand	(F)	2600	75000	0	0
Sten	(G)	2600	75000	0.2	0
Klinker	(G)	900	8000	0	0.7

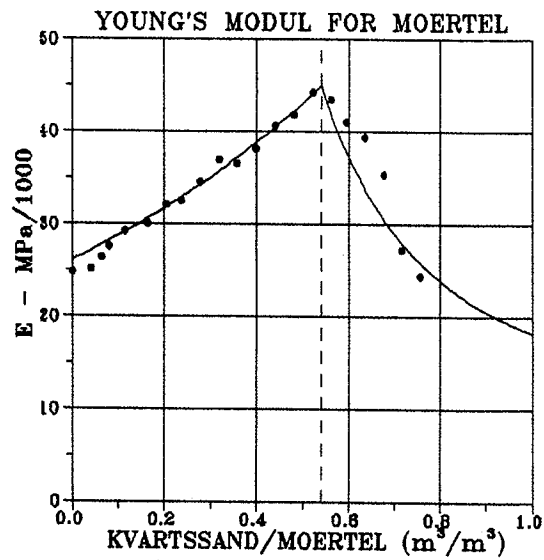
Tabel 4.1. Fysiske parametre til anvendelse for prediktion af normale betoners stivhed. (I rækkefølge; densitet, stivhed, kontaktsvigtgrad og porøsitet).

SYSTEM		μ_c	M	σ_r	σ_d
Cement	(C)	1	0.5	1	1
Kompakt fint tilslag	(F)	1	0.5	0.8	1
Kompakt groft tilslag	(G)	1	0.5	0.6	1
Kompakte luftbobler	(G)	1	1	c	0.9
Overskudshulrum i CP	(K)	0.7	1	c	1
Interferens hulrum	(H)	0.6	1	c	1

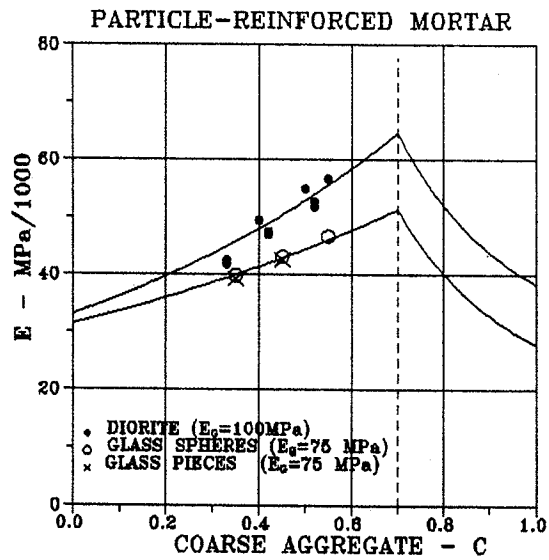
Tabel 4.2. Fasegeometriske parametre til anvendelse for prediktion af normale betoners (og mørtlers) stivhed. (I rækkefølge, formfaktor, interaktionsexponent, interferens- og kritisk partikelkoncentration). Overskudshulrum i cementpasta svarer til V_{Kc} i Figur 4.1

Eksempler

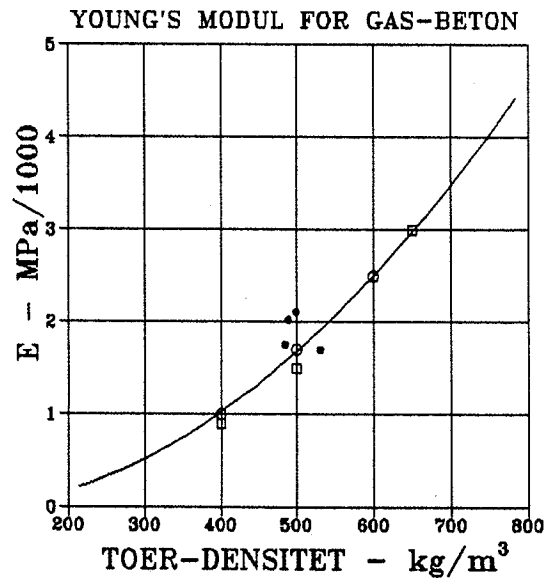
Resultater fra den udviklede prediktionsmetode sammenlignes nedenfor med nogle eksperimentelle resultater fra litteraturen. Blandingsforhold, alder, fysiske- og fasegeometriske parametre er for hvert enkelt eksempel angivet i Appendix D.



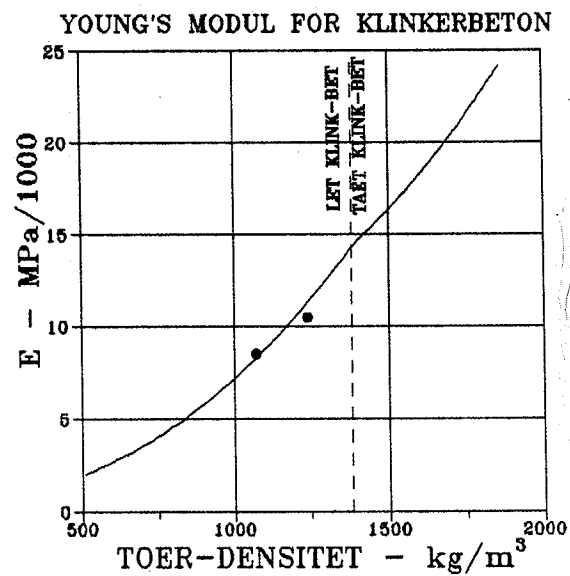
Figur 5.1. Forsøg af Ishai (15) med cement-pasta indeholdende varierende mængder kvartssand



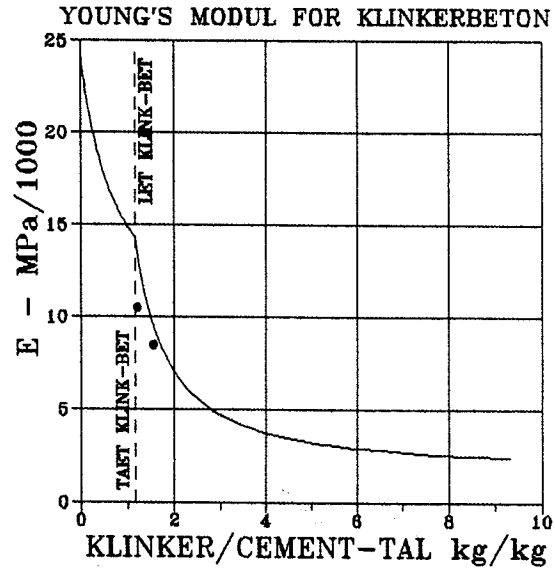
Figur 5.2. Forsøg af Dantu (16) på mørtel med grove tilslag af glas og Diorite.



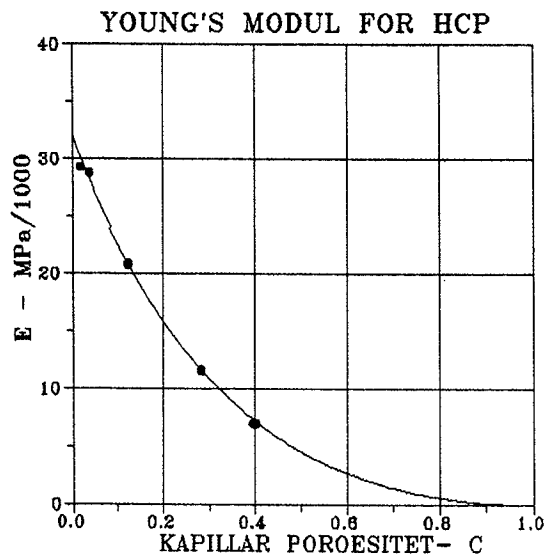
Figur 5.3. Gasbeton af forskellig densitet. Eksperimentelt baserede værdier er markeret ved udfyldt cirkel, åben cirkel og åbent kvadrat. I rækkefølge er de givet af Nielsen (17), Nielsen (18) henholdsvis Markestad (19).



Figur 5.4. Klinkerbeton. Eksperimentelle værdier fra FIBO (20,21).



Figur 5.5. Klinkerbeton. Eksperimentelle værdier fra FIBO (21).



Figur 5.6. Kapillarporøs, hårdnet Portland cementpasta. Eksperimentelle værdier fra Hel-muth og Turk (22). Predikterede værdier er baserede på en fuldmoden basispasta som ma-trix med kapillarporer som et "gastilslag", der jfr. (2) har en formfaktor på $\mu_0 = 0.4$ samt $(M, c_d) = (1, 1)$.

VI. SLUTBEMÆRKNINGER

Som tidligere nævnt bygger den udviklede metode til

prediktion af betons (og mørtels) stivhed på teorier med en veldokumenteret evne til at beskrive og forudsige diverse kompositmaterialers elastiske egenskaber.

God overensstemmelse mellem eksperimentelle og teoretiske resultater er også demonstreret i den foreliggende undersøgelse, hvor teorierne er samlet i en logisk og rationel sammenhæng, der specifikt er rettet mod betonmaterialer. Det er herved blevet muligt, at følge betonstivhedens afhængighed af tid, tilslagstype og -geometri samt kvaliteten af sammenhæng mellem faserne.

Den udviklede metode kan herved være nyttig i udviklingen af nye betonmaterialer som for eksempel højstyrke- og genbrugsbetoner - eller i forædling af eksisterende produkter som for eksempel klinker- og gasbeton.

Metodens nyancerede hensyntagen til intern geometri og sammenhængskvalitet kan nyttiggøres i sensitivitetsanalyser til en optimal anvendelse af givne naturlige ressourcer. Tilsvarende kan metoden anvendes i en egentlig materialeudviklingsproces, idet den kan anvise vejen til bedre egenskaber ved modifikation af materialets indre geometri - hvad enten modifikationen sker ved forbehandling af de indgående komponenter eller gennem en ændret produktionsproces.

Fasegeometrien er af afgørende betydning for stivheden. Mest tydeligt illustreres dette ved Ligning 3.14, der beskriver stivheden for en række porøse materialer. Formfaktorens indflydelse er betydelig. Mere skarpkantede og fladere porer (aftagende formfaktor, μ_p) fremmer stivhedsreduktionen. På samme måde forholder det sig med styrken.

Netop med basis i fasegeometrien som "fællesnævner" for en række mekaniske egenskaber for kompositmaterialer har forfatteren i et nyligt arbejde (23) bestemt sammenhængen mellem stivhed og styrke for nogle keramiske materialer. Der er herved åbnet mulighed for udvikling af metoder til ikke-destruktiv prøvning samt holdbarhedsprediktion af sådanne materialer (24,25). Det er meget sandsynligt, at der på lignende måde kan udvikles relationer mellem betons stivhed og styrke. Det er indlysende, hvilken betydning en sådan beskrivelse vil ha-

ve på udviklingen af nye betoner (og iøvrigt også andre kompositmaterialer).

En forudsætning for at nå så vidt er imidlertid en intensiveret forskning på den mekaniske virkning af materialers indre overflader.

ERKENDTLIGHED

Det foreliggende arbejde er udført som det nødvendige grundlag for en undersøgelse vedrørende stivheden af gasbeton og let klinkerbeton, der er bestilt og finansieret af "Letbetonkontrollen", et udvalg under Dansk Ingeniørforening.

Litteratur

- 1) Nielsen, L. Fuglsang: "Elastic Properties of Two-phase Materials". *Materials Science and Engineering*, 52(1982), 39-62.
- 2) Nielsen, L. Fuglsang: "Elasticity and Damping of Porous Materials and Impregnated Materials". *Journ. of the Am. Ceramic Society*, 67(1984), 93-98.
- 3) Nielsen, L. Fuglsang: "On the Prediction of Rheological Parameters for Concrete". *Nordic Seminar on Deformations in Concrete Structures*, Copenhagen march 1980. *Proc. DIA-LOG 1(1980)*, 81-118. Danish Engineering Academy, Department of Civ. Eng.
- 4) Nielsen, L. Fuglsang: "On the Prediction of Creep Functions for Concrete". Pages 279-289 in "Fundamental Research on Creep and Shrinkage of Concrete" (ed. F. W. Wittmann), Martinus Nijhoff Publishers, London 1982.
- 5) Nielsen, L. Fuglsang: "On the Effects of Defective Phase Contact on the Mechanical Behavior of Particulate Composites like Concrete". *Cement and Concrete Res.*, 12(1982), 685-696.
- 6) Nielsen, L. Fuglsang: "Elastizitätsmodul der Kompositmateriale - insbesondere Mörtel und Beton". *Acta Polytechnica Scandinavica, Physics incl. Nucleonics Series No. 65*, Ph 73(1970).
- 7) Hashin, Z. and S. Shtrikman: "Variational Approach to the Theory of Elastic Behavior of Multi-phase Materials". *Mech. Phys. Solids*, 11(1963), 127.
- 8) Nielsen, Knud E.C.: "Aggregate Stresses in Concrete". Thesis, *Proc. 41(1971)*, Swedish Cement and Concrete Res. Inst., Techn. Univ. of Stockholm, Sweden.

- 9) Hashin, Z.: "The Elastic Moduli of Heterogeneous Materials". Journ. Appl. Mech., 29(1962), 143.
- 10) Hill, R.: "Elastic Properties of Reinforced Solids; Some Theoretical Principles". Journ. Mech. Phys. Solids, 11(1963), 357.
- 11) Budiansky, B.: "On the elastic moduli of some heterogeneous materials". Mech. Phys. Solids, 13(1965), 223.
- 12) Fagerlund, G.: "Relations between Porosity and Mechanical Properties of Materials" (in swedish). Division of Building Technology, Lund Inst. of Technology, Lund, Sweden, Report 26(1972).
- 13) Hansen, T.C.: "Influence of aggregate and voids on modulus of elasticity of concrete, cement mortar, and cement paste". Journ. Am. Concr. Inst., 62(1965), 193
- 14) Helmuth, R.A. and Turk, D.H.: "Elastic Moduli of Hardened Portland Cement and Tricalcium Silicate Pastes; Effects of Porosity". Highway Res. Board, Special Report No. 90(1962), 135.
- 15) Ishai, O.: "Influence of Sand Concentration on Deformation of Mortar Beams under Low Stresses". Proc. Am. Concr. Inst. 58(1961), 611.
- 16) Dantu, M.P.: "Etude des Contraintes dans les Milieux Hétérogènes, Application au Béton". Institut Technique du Bâtiment, Annales 11(1958), 53.
- 17) Nielsen, A.: "Creep of autoclaved aerated concrete" (in swedish). Div. of Build. Technology, Techn. Univ. of Lund, Sweden. Bulletin 4(1968).
- 18) Nielsen, A.: "Silikatbygningsmaterialer". Build. Mat. Inst., Tech. Univ. of Denmark, Techn. rep. 173(1987).
- 19) Markestad, A. og Maage, M.: "Bygningsmateriallære". Vol. II, A/L Tapir, Trondheim, Norge 1978.
- 20) Fibo A/S: "Prøvningsresultater på E-modul af let klinker-beton". Fibo projekt 85.001(1986).
- 21) Fibo A/S: Kommentarer til "Prøvningsresultater på E-modul af let klinker-beton". Fibo projekt 85.001 (1986). Privat meddelelse.
- 22) Helmuth, R.A. and Turk, D.H.: "Elastic Moduli of Hardened Portland Cement and Tricalcium Silicate Pastes: Effect of Porosity", pp. 135-44 in Symposium on Structure of Portland Cement and Concrete, Highw. Res. Bd., Spec. Rept. No.90(1966).
- 23) Nielsen, L. Fuglsang: "Strength and Stiffness of Porous Materials". Journ. of the Am. Ceramic Society. In press.

24) Nielsen, L.Fuglsang: "Selvødelæggelse af impregnerede porøse materialer". Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Danmarks tekniske Højskole, Tekn. Rap. 192 (1988).

25) Nielsen, L. Fuglsang: "Frostødelæggelse i Porøse Materialer". Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Danmarks tekniske Højskole, Tekn. Rap. 197(1989).

APPENDIX ACementpastas fase- og volumentransformation

Ved hjælp af Powers og Brownyard (A1) kan følgende relationer opstilles for en cementpasta udført af 1 kg cement med vand-cementtallet, W/C:

Cementpastaens volumen er

$$V_p = 1/d_c + (W/C)/d_w \quad [m^3] \quad (A1)$$

Cementen omdannes (hydraticerer), under optagelse af 0.23 kg (kemisk bundet) vand per kg cement til et porøst produkt - den såkaldte cementgel, hvis faststofvolumen henholdsvis totalvolumen er 1.58 henholdsvis 2.2 gange cementens oprindelige volumen. Gellens (tør)densitet og porøsitet bliver herved

$$d_{gel} = 1.23*d_c/2.2 = 0.56*d_c \quad [kg/m^3] \quad (A2)$$

$$p_{gel} = 1 - 1.58/2.2 = 0.28 \quad (A3)$$

Under hydraticeringen af cementen forekommer følgende volumenmæssige forskydninger i cementpastaen

$$V_{gel} = 2.2*g(t)/d_c \quad [m^3] \quad (A4)$$

$$V_{cu} = (1 - g(t))/d_c \quad [m^3] \quad (A5)$$

$$V_{kap} = (W/C)/d_w - 1.2*g(t)/d_c \quad [m^3] \quad (A6)$$

hvor hydraticeringsgraden, $g = g(t)$, er mængden af omdannet cement til tiden t i forhold til den oprindelige mængde. Indeces, cu og kap , refererer til uhydraticeret cement henholdsvis kapillarporer (porer udover gelporerne).

APPENDIX B

Algoritme for prediktion af betonagtige materials stivhed, densitet og porøsitet

Basispasta

$$(W/C)_o = 1.2*(d_w/d_c)$$

$$E_{bas} = 3.2*10^4*g$$

$$d_{bas} = [1 + 0.23*g]*d_c/2.2$$

$$p_{bas} = 0.455*(1.2 + p_c)(1 - g) + 0.282*g$$

Cementpasta, $W/C \leq (W/C)_c$

$$c_c = [1 - 0.83(W/C) * (d_c/d_w)] / [1 + (W/C) * (d_c/d_w)]$$

$$n_c = E_c / E_{BAS}$$

$$E_F = E_{BAS} * COMP(c_c, n_c, \mu_{cc}, M_c, c_{dc})$$

$$d_F = (1 - c_c) * d_{BAS} + c_c * d_c$$

$$p_F = (1 - c_c) * p_{BAS} + c_c * p_c$$

Cementpasta, $W/C > (W/C)_c$

$$c_k = [W/C - 1.2 * (d_w/d_c)] / [W/C + d_w/d_c]$$

$$E_F = E_{BAS} * POR(c_k, \mu_{ck}, M_k, c_{dk})$$

$$d_F = (1 - c_k) * d_{BAS}$$

$$p_F = (1 - c_k) * p_{BAS} + c_k$$

Mørtel

$$V_F = (F/C) / d_F$$

$$V_F = 1/d_c + (W/C) / d_w$$

$$V_M = V_F + V_F$$

$$c_F = V_F / V_M \quad [F/C = d_F * V_F * c_F / (1 - c_F)]$$

$$n_F = E_F / E_F$$

$$n_{FFFF} = n_F * (1 - \alpha_F * [7.5 / (5 + n_F)])$$

$$c_{HF} = \text{MAX}[0, (c_F - c_{IF}) / c_F]$$

$$F_F = \text{POR}(c_{HF}, \mu_{oHF}, M_{HF}, c_{dHF})$$

$$E_M = E_F * \text{COMP}(c_F, n_{FFFF}, \mu_{oF}, M_F, c_{dF}) * F_F$$

$$d_M = [(1 - c_F) * d_F + c_F * d_F] * (1 - c_{HF})$$

$$p_M = [(1 - c_F) * p_F + c_F * p_F] * (1 - c_{HF}) + c_{HF}$$

$$V_M^* = V_M / (1 - c_{HF})$$

Beton

$$V_G = (G/C) / d_G$$

$$V_B = V_M^* + V_G$$

$$c_G = V_G / V_B \quad [G/C = d_G * (V_M^*) * c_G / (1 - c_G)]$$

$$n_G = E_G / E_M$$

$$n_{GGFF} = n_G * (1 - \alpha_G * [7.5 / (5 + n_G)])$$

$$c_{HG} = \text{MAX}[0, (c_G - c_{IG}) / c_G]$$

$$F_G = \text{POR}(c_{HG}, \mu_{oHG}, M_{HG}, c_{dHG})$$

$$E_B = E_M * \text{COMP}(c_G, n_{GGFF}, \mu_{oG}, M_G, c_{dG}) * F_G$$

$$d_B = [(1 - c_G) * d_M + c_G * d_G] * (1 - c_{HG})$$

$$p_B = [(1 - c_G) * p_M + c_G * p_G] * (1 - c_{HG}) + c_{HG}$$

$$V_B^* = V_B / (1 - c_{HG})$$

APPENDIX C

FORTRAN PROGRAM for prediktion af betonagtige materials stivhed, densitet og porøsitet

```

c*****
c#           E-BET.FOR           #
c*****
c#           beregner stivheden af beton i henhold til           #
c#           Teknisk Rapport TR-20B(1990)           #
c#           Laboratoriet for Bygningsmaterialer           #
c#           Danmarks tekniske Højskole           #
c*****
c#           (C) Copyright 1990 L. Fuglsang Nielsen           #
c*****
      implicit real*8 (a-h,k-z)
      dimension del(150,4)
c ***** IND-DATA *****
      data dw/1000.d0/
      data eba/32.d3/
      data myc/1.d0/,mc/0.5d0/,cdc/1.d0/
      data myk/0.6d0/,mk/1.d0/,cdk/1.d0/
      data myh/0.7d0/,mh/1.d0/,cdh/1.d0/
      data mf/0.5d0/,cdf/1.d0/
      data mg/0.5d0/,cdg/1.d0/

c
      open (8,file='\fortran\programs\e-beton\betdat.dat',
           &status='old')
      read(8,*)
      #wc,fc,g,typ,
      #dc,ec,alfac,pc,
      #df,ef,alfaf,pf,
      #dg,eg,alfag,pg,
      #myf,cif,
      #myg,cig
c Hvis luftbobler !!!! *****
      if(ef.eq.0.) cdf=cif
      if(eg.eq.0.) cdg=cig
      if(ef.eq.0.) mf=1.
      if(eg.eq.0.) mg=1.
c i disse tilfælde, sættes senere cif=cf og cig=cg
c
      eba=(0.7+0.15*typ)*eba
c
c ***** VEDR. DATAREPRESENTATION, INTERNT OG EXTERNT *****
      open (9,file='\fortran\programs\e-beton\beton.txt',status='new')
      open (5,file='\grapher\e-beton\letbeton.dat',status='new')
      open (7,file='\grapher\e-beton\del.dat',status='new')
c
      write(9,154)
      #wc,fc,g,typ,
      #dc,ec,alfac,pc,
      #df,ef,alfaf,pf,
      #dg,eg,alfag,pg,
      #myf,cif,
      #myg,cig
c
c ***** VOLUMENER *****
      vp=1./dc+wc/dw
      vf=fc/df
      vm=vp+vf
c ***** CEMENTPASTA *****
      ebas=eba*g
      dbas=(1.+0.23*g)*dc/2.2

```



```

pbas=0.455*(1.2+pc)*(1.-g)+0.282*g
wc0=1.2*(dw/dc)
if(wc.ge.wc0) goto 17
c
x=dc/dw
cc=(1.-0.83*wc*x)/(1.+wc*x)
nc=ec/ebas
nc=nc*(1.-alfac**7.5/(5.+nc))
call comp(cc,nc,myc,mc,cdc,exx)
ep=ebas*exx
dp=cc*dc+(1.-cc)*dbas
pp=cc*pc+(1.-cc)*pbas
goto 18
c
17 x=dw/dc
ck=(wc-1.2*x)/(wc+x)
call por(ck,myk,mk,cdk,eex)
ep=ebas*eex
dp=(1.-ck)*dbas
pp=ck*1.+(1.-ck)*pbas
18 continue
c ***** MØRTEL *****
cf=vf/vm
nf=ef/ep
nf=nf*(1.-alfaf**7.5/(5.+nf))
c
if(nf.eq.0.) cif=cf
c
call all(ep,cf,nf,myf,mf,cif,cdf,myh,mh,cdh,em,ch)
call denpor(cf,ch,pp,dp,pf,df,dm,pm)
c
vmtot=vm/(1.-ch)
c ***** BETON *****
write(9,155)
ng=eg/em
ng=ng*(1.-alfag**7.5/(5.+ng))
c
do 100 i=1,101
cg=dble(i-1)/100.
if(cg.ne.1.) gc=dg*vmtot*cg/(1.-cg)
if(cg.eq.1.) gc=1.d10
c
if(ng.eq.0.) cig=cg
c
call all(em,cg,ng,myq,mq,cig,cdq,myh,mh,cdh,eb,ch)
call denpor(cg,ch,pm,dm,pg,dg,db,pb)
c
ex=eb/1000.
write(5,500) cg,ch,ex,db,gc,pb
write(9,500) cg,ch,ex,db,gc,pb
c
for nedenstående delelinie
if(dabs(cg-cig).ge.(1./100.)) goto 100
edel=ex/20.
cidel=cig
dbdel=db
gcdel=gc
c
100 continue
c***** DELELINIE VED INTERFERENS AF GROFT TILSLAG *****
do 33 i=1,101
del(i,1)=edel*dble(i-1)
del(i,2)=cidel
del(i,3)=dbdel

```

```

      del(i,4)=gcdel
33 continue
      do 34 i=1,101
34 write(7,55) del(i,1),del(i,2),del(i,3),del(i,4)
55 format(' ',4(i9,f8.3))
c ***** FORMATS *****
c
154 format('1',//,
  $5x' BLANDING, MOENHED, TESTTYPE',/,
  $5x' W/C F/C G(t) TEST(st:1 dyn:2)',/,
  $5x'-----',/,
  $2x,3(3x,f4.2),8x,f4.2///,
  $5x' FYS-PARAMETRE',/,
  $5x' Fase (index) d[kg/m3] E[MPa]  $\alpha$  p',/,
  $5x'-----',/,
  $5x' Cement (C) ',f6.1,3x,f8.1,2x,f4.2,3x,f4.2,/,
  $5x' Fint tilsl (F) ',f6.1,3x,f8.1,2x,f4.2,3x,f4.2,/,
  $5x' Groft tilsl (G) ',f6.1,3x,f8.1,2x,f4.2,3x,f4.2,///,
  $5x' FASE-GEOMETRI',/,
  $5x' Fase (index)  $\mu_0$  Ci,Cd',/,
  $5x'-----',/,
  $5x' Fint tilsl (F)',2(2x,f4.2),/,
  $5x' Groft tilsl (G)',2(2x,f4.2),/,
  $5x'-----',/,
  $5x' Fast tilslag: Ci',/,
  $5x' Luftbobler: Cd',///)
c
155 format(' ',3x,' C Ch E/l.d3 Ddry G/C TOT-PORØS',/)
500 format(' ',2x,f4.2,2x,f4.2,2x,f6.2,2x,f6.1,2x,1pe9.3,2x,0pf5.3)
      stop
      end
c ***** SUBROUTINES *****
      subroutine all(e1,c,n,my,m,ci,cd,myhh,mhh,cdhh,e,ch)
c *****
      implicit real*8 (a-h,k-z)
      xh=c-ci
      if(xh.le.0.) ch=0.
      if(xh.gt.0.) ch=xh/c
      call por(ch,myhh,mhh,cdhh,f)
      call comp(c,n,my,m,cd,eee)
      e=e1+eee
      return
      end
c *****
      subroutine denpor(c,ch,p1,d1,p2,d2,d,p)
c *****
      implicit real*8 (a-h,k-z)
      d=((1.-c)*d1+c*d2)*(1.-ch)
      p=((1.-c)*p1+c*p2)*(1.-ch)+ch
      return
      end
c *****
      subroutine comp(c,n,my0,m,cd,ee)
c *****
      implicit real*8 (a-h,k-z)
      if(c.le.cd) my=my0*(1.-c/cd)**m
      if(c.gt.cd) my=-my0*(c/cd-1.)**m
      x=my*(1.-n)
      teta=0.5*(x+(x**4+.n)**0.5)
      ee=(n+teta+teta*(n-1.)*c)/(n+teta-(n-1.)*c)
      return
      end
c *****
      subroutine por(c,my0,m,cd,eee)

```

```

c *****
  implicit real*8 (a-h,k-z)
  if(c.le.cd) tet0=my0*(1.-c/cd)**m
  if(c.gt.cd) tet0=0.
  eee=tet0*(1.-c)/(tet0+c)
  return
end

```

Eksempel på udskrift

```

      BLANDING, MOENHED, TESTTYPE
W/C   F/C   G(t)  TEST(st:1 dyn:2)
-----
.43   1.80   .67    2.00

```

```

      FYS-PARAMETRE
Fase  (index) d[kg/m3] E[MPa]  α    ρ
-----
Cement (C) 3150.0  75000.0  .00  .00
Fint tilsl (F) 2600.0  75000.0  .00  .00
Groft tilsl (G) 2600.0  100000.0  .12  .00

```

```

      FASE-GEOMETRI
Fase  (index)  p0  Ci,Cd
-----
Fint tilsl (F) 1.00  1.00
Groft tilsl (G) 1.00  .70

```

```

Fast tilslag: Ci
Luftbobler: Cd

```

```

C   Ch  E/1.d3  Ddry   G/C  TOT-PORØS
.00 .00  33.69  2053.2  .000E+00  .213
.01 .00  33.99  2058.7  3.779E-02  .210
.02 .00  34.29  2064.2  7.634E-02  .208
.03 .00  34.59  2069.6  1.157E-01  .206
.04 .00  34.90  2075.1  1.559E-01  .204

.94 .26  40.69  1911.7  5.861E+01  .265
.95 .26  40.11  1895.6  7.108E+01  .271
.96 .27  39.56  1879.9  8.978E+01  .277
.97 .28  39.02  1864.5  1.210E+02  .283
.98 .29  38.51  1849.3  1.833E+02  .289
.99 .29  38.00  1834.5  3.703E+02  .294
1.00 .30  37.52  1820.0  1.000E+10  .300

```

APPENDIX D

Materiale- og prediktionsdata

Figur 5.1: Mørtel, Ishai (15)

Alder: 28 døg

Prediktionen foretages mest bekvemt ved at sætte F/C = 0 og sand = groft tilslag

BLANDING, MODENHED, TESTTYPE			
W/C	F/C	G(t)	TEST(st:1 dyn:2)
.32	.00	.75	2.00

FYS-PARAMETRE					
Fase	(index)	d[kg/m ³]	E[MPa]	α	ρ
Cement	(C)	3150.0	75000.0	.00	.00
Fint tilsl	(F)	2600.0	75000.0	.00	.00 (lige gyldig)
Groft tilsl	(G)	2600.0	75000.0	.00	.00 (Kvartssand)

FASE-GEOMETRI			
Fase	(index)	ρ_0	Ci, Cd
Fint tilsl	(F)	1.00	1.00 (lige gyldig)
Groft tilsl	(G)	1.00	.54

Fast tilslag: Ci
Luftbobler: Cd

Figur 5.2: Mørtel+groft tilslag - Dantu (16)

Alder: Glas 13 døg, Diorite 15 - 24 døg

BLANDING, MODENHED, TESTTYPE			
W/C	F/C	G(t)	TEST(st:1 dyn:2)
.43	1.80	.67	2.00 (Diorite)
.43	1.80	.60	2.00 (Glas)

FYS-PARAMETRE					
Fase	(index)	d[kg/m ³]	E[MPa]	α	ρ
Cement	(C)	3150.0	75000.0	.00	.00
Fint tilsl	(F)	2600.0	75000.0	.00	.00 (Sand)
Groft tilsl	(G)	2600.0	100000.0	.12	.00 (Diorite)
Groft tilsl	(G)	2600.0	75000.0	.15	.00 (Glas)

FASE-GEOMETRI			
Fase	(index)	ρ_0	Ci, Cd
Fint tilsl	(F)	1.00	1.00
Groft tilsl	(G)	1.00	.70

Fast tilslag: Ci
Luftbobler: Cd

Figur 5.3: Gasbeton
 Alder ved prøvning: Kort tid efter fremstilling

BLANDING, MODENHED, TESTTYPE				
W/C	F/C	G(t)	TEST(st:1 dyn:2)	
.55	1.00	1.00	1.00	(skønnet)

FYS-PARAMETRE					
Fase	(index)	d[kg/m ³]	E[MPa]	α	p
Cement	(C)	3150.0	75000.0	.00	.00
Fint tilsl	(F)	2600.0	75000.0	.00	.00 (Sand)
Groft tilsl	(G)	.0	.0	.00	1.00 (Gasbobler)

FASE-GEOMETRI		
Fase	(index)	ρ_0 Ci, Cd
Fint tilsl	(F)	1.00 1.00
Groft tilsl	(G)	1.00 .95

Fast tilslag: Ci
 Luftbobler: Cd

Figur 5.4+5.5: Klinker-beton - FIBO (20+21)
 Alder ved prøvning: Kort tid efter fremstilling

BLANDING, MODENHED, TESTTYPE				
W/C	F/C	G(t)	TEST(st:1 dyn:2)	
.50	1.20	.80	1.00	(Skønnet W/C)

FYS-PARAMETRE					
Fase	(index)	d[kg/m ³]	E[MPa]	α	p
Cement	(C)	3150.0	75000.0	.00	.00
Fint tilsl	(F)	2600.0	75000.0	.00	.00 (Sand)
Groft tilsl	(G)	900.0	8000.0	.00	.70 (Klinker)

FASE-GEOMETRI		
Fase	(index)	ρ_0 Ci, Cd
Fint tilsl	(F)	1.00 1.00
Groft tilsl	(G)	1.00 .50

Fast tilslag: Ci
 Luftbobler: Cd

Figur 5.6: Kapillarporøsitet i cementpasta Helmuth-Turk (22)
 Alder ved prøvning: Tæt ved 100 % moden

Prediktionen foretages mest bekvemt ved at sætte F/C = 0 og porer = groft tilslag

BLANDING, MODENHED, TESTTYPE			
W/C	F/C	G(t)	TEST(st:1 dyn:2)
.38	.00	1.00	2.00

FYS-PARAMETRE					
Fase	(index)	d[kg/m ³]	E[MPa]	α	ρ
Cement	(C)	3150.0	75000.0	.00	.00
Fint tilsl	(F)	2600.0	75000.0	.00	.00 (lige gyldig)
Groft tilsl	(G)	.0	.0	.00	1.00 (kapillarporer)

FASE-GEOMETRI				
Fase	(index)	μ_0	Ci, Cd	
Fint tilsl	(F)	1.00	1.00	(lige gyldig)
Groft tilsl	(G)	.40	1.00	(kapillarporer)

Fast tilslag: Ci
Luftbobler: Cd

Litteratur - Appendix

A1) Powers, T.C. and T.L. Brownyard: "Studies of the physical Properties of hardened Cement Paste". ACI Journ., Proc. 41(1946-47), 101, 249, 469, 549, 669, 845, 865, 933, 971.